

## Tema 6.- EL CAMPO MAGNÉTICO (RESUMEN)

### • Ley de Ampère para el campo magnético

La ley de Ampère establece que la circulación del campo magnético a lo largo de una línea cerrada  $L$  que enlaza las corrientes  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ , ... depende únicamente de las corrientes que atraviesan una superficie delimitada por la línea cerrada:

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I$$

donde  $I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots$  es la corriente enlazada por la línea cerrada  $L$ .

Cuando se aplica la ley de Ampère consideramos que la corriente es positiva si pasa a través de la línea  $L$  en el sentido indicado por el dedo pulgar, cuando se utiliza la regla de la mano derecha para indicar la forma en que está orientada la trayectoria, y negativa en el sentido opuesto.

La ley de Ampère puede usarse para obtener el campo magnético producido por distribuciones de corriente con gran simetría. El campo magnético en el interior de un solenoide largo de vueltas apretadas, con  $n$  vueltas por unidad de longitud, y por el que circula una corriente  $I$ , viene dado por:

$$B = \mu_0 n I$$

### • Flujo del campo magnético

Se define el flujo del campo magnético a través de una superficie  $S$  como la integral de superficie del vector campo magnético extendida a toda la superficie:

$$\Phi_B = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}$$

La Ley de Gauss para el campo magnético establece que el flujo magnético a través de una superficie cerrada es nulo, de acuerdo con la inexistencia de monopolos magnéticos:

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$$

Las líneas del campo magnético son cerradas sobre sí mismas.

### • Magnetización de la materia

Los electrones que están en órbita en los átomos pueden tratarse como pequeños dipolos magnéticos que tienen un momento magnético asociado con sus momento angular y su spin.

Según un modelo simple, un electrón que se mueve en una órbita alrededor de un núcleo tiene un momento magnético  $\mathbf{m}_L$  proporcional a su momento angular  $\mathbf{L}$ , dado por:

$$\mathbf{m}_L = -\frac{e}{2m_e} \mathbf{L}$$

y también presenta una contribución  $\mathbf{m}_S$  al momento magnético total  $\mathbf{m}$  debida al momento angular de spin  $\mathbf{S}$ , dada por:

$$\mathbf{m}_S = -\frac{e}{m_e} \mathbf{S}$$

donde  $e$  y  $m_e$  son la carga y la masa del electrón, respectivamente.

Los átomos y las moléculas pueden o no tener un momento dipolar magnético neto, dependiendo de su simetría y de la orientación relativa de sus órbitas electrónicas. Los agregados de materia, con excepción de las sustancias **ferromagnéticas**, no poseen un momento magnético neto, debido a la orientación al azar de sus moléculas. Sin embargo, la presencia de un campo magnético externo distorsiona el movimiento electrónico, dando lugar a una

polarización magnética o **magnetización** del material. Las sustancias se pueden agrupar en varios tipos, dependiendo de la forma en que son magnetizadas por un campo magnético externo. Se habla de diamagnetismo, paramagnetismo y ferromagnetismo, así como de antiferromagnetismo y ferrimagnetismo.

### • Vector magnetización

La **magnetización**  $\mathbf{M}$  de un material es una magnitud vectorial definida como el momento dipolar magnético del material por unidad de volumen. Si  $\mathbf{m}$  es el momento dipolar magnético inducido por átomo o molécula y  $n$  el número de átomos o moléculas por unidad de volumen, la magnetización es:

$$\mathbf{M} = n\mathbf{m}$$

La magnetización tiene dimensiones de corriente por unidad de longitud y en el S.I. se mide en A/m.

La corriente de magnetización efectiva por unidad de longitud,  $I_{\text{mag}}$ , sobre la superficie de un trozo de material magnetizado es igual a la componente del vector magnetización,  $M$ , paralela al plano tangente a la superficie del cuerpo, y tiene dirección perpendicular a  $\mathbf{M}$ .

### • El campo magnetizante

El vector intensidad magnética o campo magnetizante  $\mathbf{H}$  está dado por la relación:

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M})$$

$\mathbf{H}$  se expresa en A/m. En un medio lineal con permeabilidad magnética  $\mu$  esta relación puede expresarse como:

$$\mathbf{B} = \mu\mathbf{H} \quad (\text{medio lineal})$$

El vector  $\mathbf{H}$  depende sólo de las corrientes libres, siendo su valor independiente de las corrientes de magnetización. La ley de Ampère para el vector  $\mathbf{H}$  se escribe:

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I_{\text{libre}}$$

### • Susceptibilidad y permeabilidad magnéticas

El vector  $\mathbf{M}$  es proporcional al campo magnetizante  $\mathbf{H}$ :

$$\mathbf{M} = \chi_m \mathbf{H}$$

$\chi_m$  es la **susceptibilidad magnética** del material. Teniendo esto en cuenta, se puede escribir:

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) = \mu_0(\mathbf{H} + \chi_m \mathbf{H}) = \mu_0(1 + \chi_m)\mathbf{H} = \mu\mathbf{H}$$

la cantidad:

$$\mu_r = 1 + \chi_m$$

es la permeabilidad relativa del medio y  $\mu = \mu_r \mu_0$  es la **permeabilidad** del medio. En materiales diamagnéticos y paramagnéticos  $\chi_m$  es muy pequeño (por ejemplo,  $-2.4 \times 10^{-6}$  para el sodio o  $2.3 \times 10^{-5}$  para el aluminio), por lo que para estos materiales  $\mu_r \approx 1$ .

En los materiales **diamagnéticos** un campo magnético externo induce momentos dipolares magnéticos en las moléculas que lo componen. En este caso los vectores  $\mathbf{M}$  y  $\mathbf{B}$  tienen distinto sentido y  $\chi_m < 0$ .

En los materiales **paramagnéticos** el momento magnético permanente de los electrones desapareados tiende a alinearse

con el campo magnético externo. En este caso los vectores **M** y **B** son paralelos y tienen el mismo sentido, siendo ahora  $\chi_m > 0$ . Los vectores **M** y **B** están relacionados por la ley de Curie:

$$\mathbf{M} = \frac{C\mathbf{B}}{\mu_0 T}$$

válida mientras el material no se encuentre a baja temperatura o sometido a un campo magnético intenso.

En un material **ferromagnético** los momentos magnéticos moleculares se encuentran alineados dentro de cada dominio magnético. Cuando los dominios magnéticos son orientados preferencialmente en una dirección, mediante la aplicación de un campo externo, la muestra adquiere una intensa magnetización. La magnetización persiste una vez retirado el campo en materiales ferromagnéticos duros, dando lugar a imanes permanentes.

#### • Energía del campo magnético

La energía de un campo magnético almacenada en un volumen  $V$  está dada por la expresión:

$$U_B = \frac{1}{2\mu_0} \int_V \mathbf{B}^2 dV$$

La **densidad de energía**  $u_B$  en el espacio ocupado por el campo (en el vacío) es:

$$u_B = \frac{1}{2\mu_0} \mathbf{B}^2$$

En un medio material lineal basta sustituir  $\mu_0$  por  $\mu$ . La energía magnética total  $U_B$  en un volumen  $V$  se calculará mediante la integral:

$$U_B = \int_V u_B dV$$